

# VR 内の仮想環境を用いた 切羽監視支援システムの有効性

長谷 陵平<sup>1</sup>・三原 泰司<sup>2</sup>・淡路 動太<sup>3</sup>・北條 理恵子<sup>4</sup>・清水 尚憲<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 清水建設株式会社 地下空間統括部 (〒104-8370 東京都中央区京橋 2-16-1)  
E-mail: suzuki\_ryo@shimz.co.jp

<sup>2</sup>正会員 清水建設株式会社 地下空間統括部 (〒104-8370 東京都中央区京橋 2-16-1)  
E-mail: mihara.yas@shimz.co.jp

<sup>3</sup>正会員 清水建設株式会社 地下空間統括部 (〒104-8370 東京都中央区京橋 2-16-1)  
E-mail: awaji@shimz.co.jp

<sup>4</sup>非会員 長岡技術科学大学 システム安全工学専攻 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)  
E-mail: r\_hojo@vos.nagaokaut.ac.jp

<sup>5</sup>非会員 独立行政法人労働者健康安全機構労働安全衛生研究所 新技術安全研究グループ  
(〒204-0024 東京都清瀬市梅園 1-4-6)  
E-mail: shimizu@s.jnei.osh.go.jp

トンネル施工現場での肌落ちによる危害発生の回避には、肌落ち発生前に警報を発生し、切羽からの作業員の退避時間を確保する必要がある。従来、人の目視によって危険源としての亀裂を同定してきたが、仮設足場や高所作業車を用いる現場があることから、安全上や時間的制約、経済的負担等の問題があり、目視の実施が困難な領域も少なくない。この問題の解決法として、AIを搭載したカメラを用いた鏡吹付け面における亀裂同定の支援をする「切羽監視支援システム」を開発している。本稿では、開発の経緯とVRによる鏡吹き付け部位の亀裂画像を用いた実験を行うことで、人による目視と比較して、亀裂同定がより効果的であるかどうかを実験的に検証し、効果を定量的かつ客観的に評価する。

**Key Words:** mountain tunnel, AI, VR, tunnel face monitoring supportive system, crack monitoring

## 1. はじめに

トンネル施工現場での肌落ちによる危害の回避には、肌落ち発生前に警報を発生し、切羽からの作業員の退避時間を確保する必要がある。従来、人の目視によって危険源としての亀裂を同定してきたが、仮設足場や高所作業車を用いる現場があることから、安全上や時間的制約、経済的負担等の問題があり、目視の実施が困難な領域も少なくない。この問題の解決法として、AIを搭載したカメラを用いた鏡吹付け面における亀裂同定の支援をする「切羽監視支援システム」を開発している。<sup>1) 2)</sup>このシステムにより、危険点近接作業を回避して安全を確保しつつ、的確で迅速な亀裂の同定が可能となる。本稿では、開発の経緯とその有効性について報告する。本稿は、令和3年度経済産業省委託事業予算で実施した実証事例検証の内容によるものである。

### (1) 切羽監視支援システムの概要

切羽監視支援システムの概要図を図-1に示す。現場で本システムを実運用する際には、切羽監視責任者による判断の補助として使用することを想定している。切羽監視責任者より早期の亀裂検知や死角に発達する亀裂の検知が可能になるため、本システムの導入により、より綿密な切羽監視が実現し、山岳トンネル工事での事故の低減に寄与することを期待している。以下に本システムの機能を示す。

#### a) 亀裂検知機能

切羽近傍の側壁部もしくは重機等にカメラを設置し、作業員が切羽近傍に立ち入らなければいけない作業において、常に切羽映像を取得できるようにしている。カメラ映像と解析用PC(制御盤内)はオンサイトで接続されリアルタイムに解析を実施できるため、切羽崩壊の前

兆現象の一つである亀裂を常に監視し、発生と同時に検知できるようになっている。

映像情報からAIが搭載されたPCでの解析を行い、その状況をタブレット等のスクリーンに映すことで切羽監視責任者が自身の目で切羽を監視しつつ、死角から撮影されている映像の解析結果と比較することができ、亀裂の検知を迅速に確認できる。発生する亀裂のパターンをディープラーニングによって学習したAIにより、撮影中の動画をリアルタイムに解析することで、吹付けコンクリート面に発生する亀裂の検知を行う。本システムにディープラーニングを適用するメリットは、撮影動画中に入り込む人や機械などのノイズに対して強いこと、シンプルな設備群でシステム化が可能でオンサイトで計算処理を完結できることが挙げられる。一方、検知された亀裂の信頼性や有効性については十分な検証が必要である点に注意が必要である。

#### b) 警報発信機能

亀裂を検知した際、素早く警報を行うことで作業員の退避を促すことが可能となる。

亀裂発生による警報は作業員に迅速かつ確実に伝達す

る必要があるため、切羽の変色が明確に見えるLED照明と広範囲かつ明瞭な効果が期待できる警報音を用いる。ライトと警報音は坑内の騒音下（送風機、集塵設備、作業機械等）で警報音を確認し、実装備させる。

#### (2) 鏡クラック検知AIの構築とクラック検知性能

従来の制御工学においては、人がルールを定義し、PCにプログラムしていた。このルールは非常に堅く、かつ人が想定内で設定する数量であるため、プログラムではその入力を適切に処理できず、予期せぬ動作やエラーが発生してしまうという弱点があった。その一方でディープラーニングでは、バリエーションのある実データを用い、人がプログラムできない程の多数のパラメータやルールを「学習」させることで、人が未知の事象に対し経緯を以って判別するように曖昧さを吸収するルールをコンピュータが作り出すことができる。従って、トンネル坑内の切羽近傍のような環境変化の厳しい条件下でも、亀裂の抽出を高い精度で実施できる可能性が高い手法であると考えられる。<sup>1)</sup>

機械掘削現場にて鏡吹付けコンクリートが崩落する状

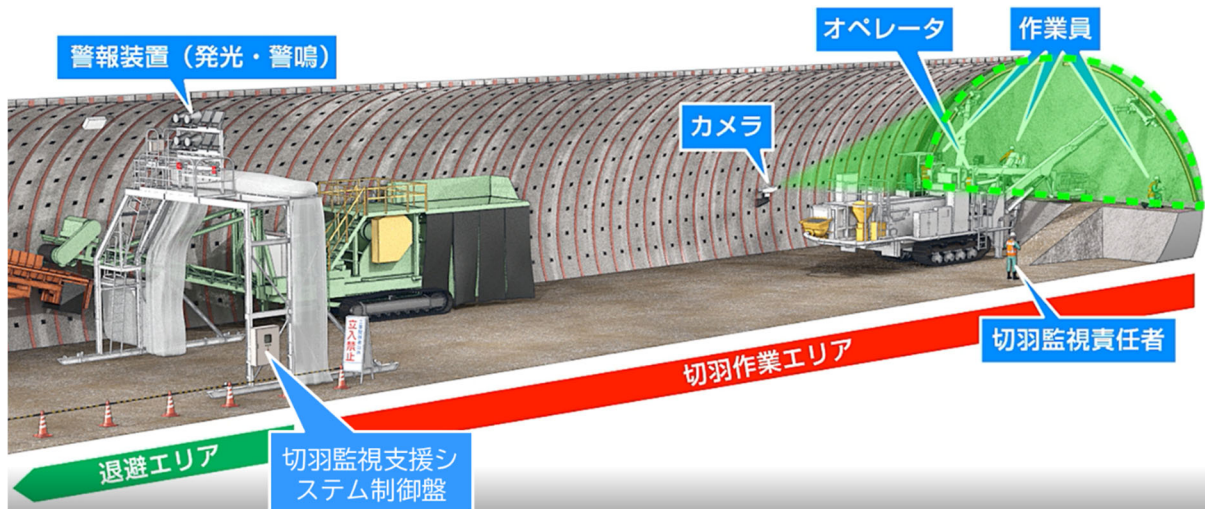
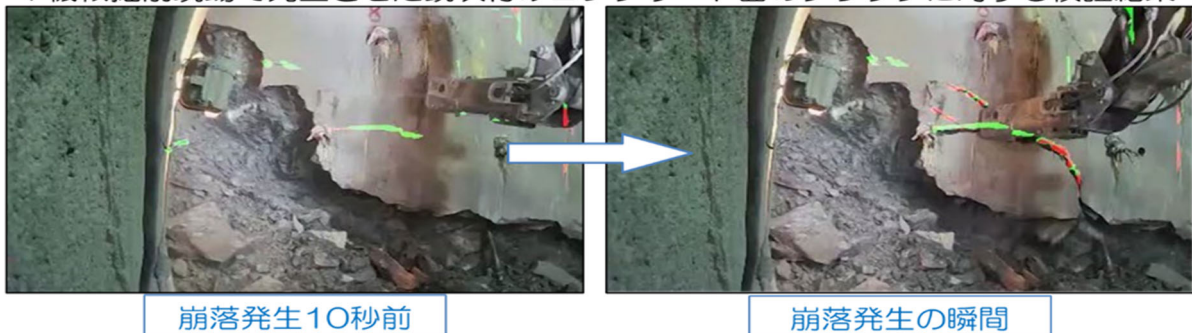


図-1 切羽監視支援システムの概要

#### ◆機械掘削現場で発生させた鏡吹付けコンクリート面のクラックに対する検証結果



■実際のクラックに対して十分な検知精度を確保していると考えられる。

図-2 AIモデルの実際の亀裂に対する検出性能

況を撮影した映像を用いて、構築された AI モデルを適用し、実際の亀裂に対する検出性能の確認を行った例を示す。崩落発生 10 秒前の状況及び、崩落発生の瞬間を図-2に示す。このように、疑似クラックを用いて学習した AI モデルでも、実際の亀裂に対して十分に検出精度を確保している。また、Semantic Segmentationにより、亀裂発生のリアルタイム検知を可能としているため、崩落発生の前兆として発達し始めている亀裂を瞬時に識別し、警告を発することが可能になると期待される。<sup>1)</sup>

## 2. VR を用いた実験方法

### (1) 実験概要

切羽監視支援システム構築の第一ステップとして、VR による鏡吹き付け部位の亀裂画像を用いて、切羽の

一部または全面を鏡クラック検知 AI 搭載カメラで監視することで、従来の目視による監視と比較して、亀裂同定がより効果的であるかどうかを実験的に検証し、効果を定量的かつ客観的に評価する。本実験は、2021 年 12 月 7～9 日に亘り、独立行政法人労働者健康安全機構労働安全衛生総合研究所施工シミュレーション施設 (W15.2m×L33.2m×H10m) において行われた。実験協力者は、建設会社に勤務する 25 歳から 48 歳、勤務歴 2 年から 26 年の 8 人とした (現場経験及び職位等は表-1 参照)。

VR 内に切羽環境(支保工建込作業)を再現し、鏡吹き付け面に発生する亀裂を発見するシステム (図-3-4) を構築し、実験を実施した。実験作業面積は幅 15.3m×奥行 26.5m、スタートライン (図-3-1, 2) から 26m離れた位置に幅 15.3m×高さ 9.8mの切羽を仮想的に設置し、切羽前面中央に重機 (エレクター:幅 3.3m×延長 12m(アー

表-1 実験協力者 8 名のトンネル現場経験実態及び職位

実験協力者 ID	現場経験と職位
A	山岳トンネル現場を 2 現場経験(地質担当)
B	山岳トンネル現場を 2 現場経験(1 年程度掘削担当)
C	現場工事長クラス(6 現場経験, 総掘削延長約 6km)
D	トンネル現場経験はあるが、掘削担当としての経験はない
E	現場工事長クラス(6 現場経験, 総掘削延長約 7km)
F	山岳トンネル現場を 1 現場経験(半年程度掘削担当)
G	現場工事長クラス(4 現場経験, 総掘削延長約 3km)
H	現場所長クラス(10 現場経験, 総掘削延長約 7km)

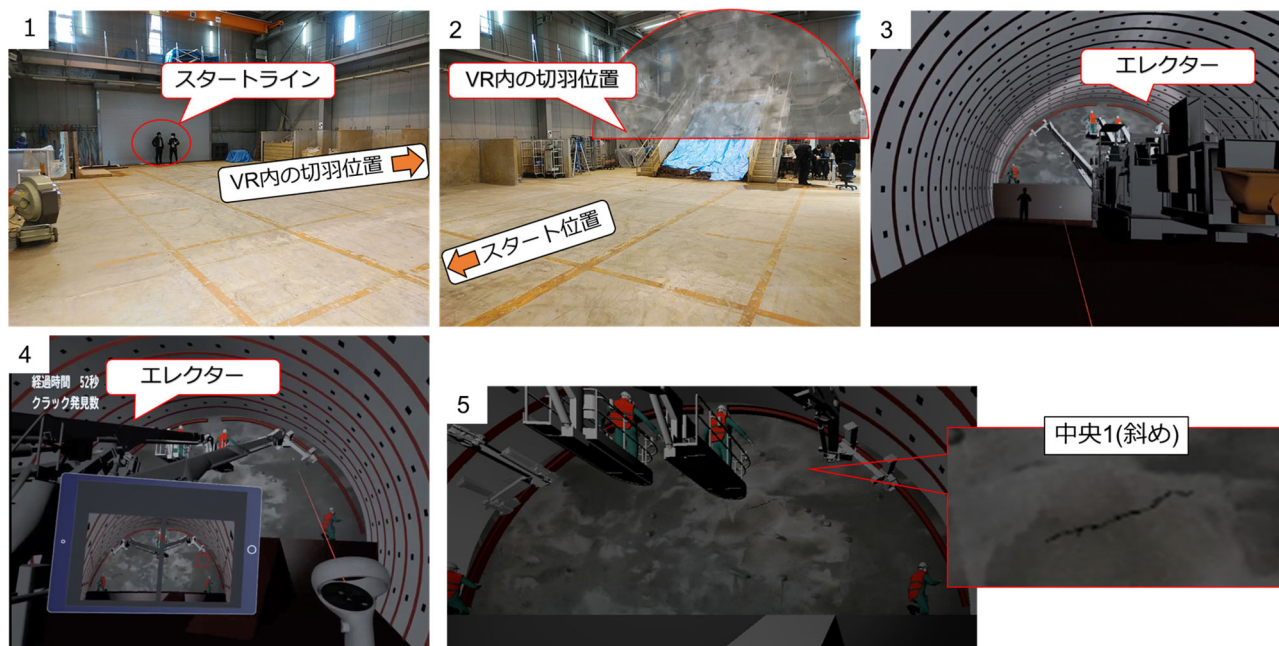


図-3 実験状況(1, 2)とVR 仮想環境内状況(3～5)

ム部除く)×高さ約 7.5m) を配置した (図-3-3)。

(2) 実験ケース

切羽監視責任者を想定した実験協力者は、1) 目視のみによる亀裂検知、鏡クラック検知 AI を用いて、2) 切羽の右半面の亀裂、3) 左半面の亀裂、4) 左右の亀裂の検知を支援することによる協調監視をそれぞれ実施し、支援の有用性を確認した。実験協力者が実験施設内に入室後、ヘッドマウントディスプレイ (Oculus quest2, Meta 社) を装着、亀裂検知の告知と記録を行うコントローラーを左右の手に携帯し、VR 内の亀裂の同定をなるべく早く行う。

VR 画像制作を行った企業 (ポケットクエリーズ社、

東京) により、VR 操作の簡単なレクチャーを行った後、実験協力者は切羽から 26m 後退した場所に設けたスタートラインに立ち、合図とともに実験を開始した (図-3)。実験は、トンネル坑内環境 (支保工建込) を模擬した VR 内において、鏡吹付け面に出現する亀裂 5 種類 (中央(斜めと水平)、天端、左肩、右肩) を発見する内容である。亀裂は大規模な切羽崩落、災害に繋がりやすい切羽崩落の予兆と考えられる亀裂を再現した。大規模な切羽崩落の予兆として、切羽全面の崩落に繋がると考えられる中央付近に発生する亀裂を再現した。また、小規模な崩落でも岩塊の落下等で災害に繋がると考えられる切羽上方の岩塊崩落の予兆を、天端・左肩・右肩に発生する亀裂により再現した。

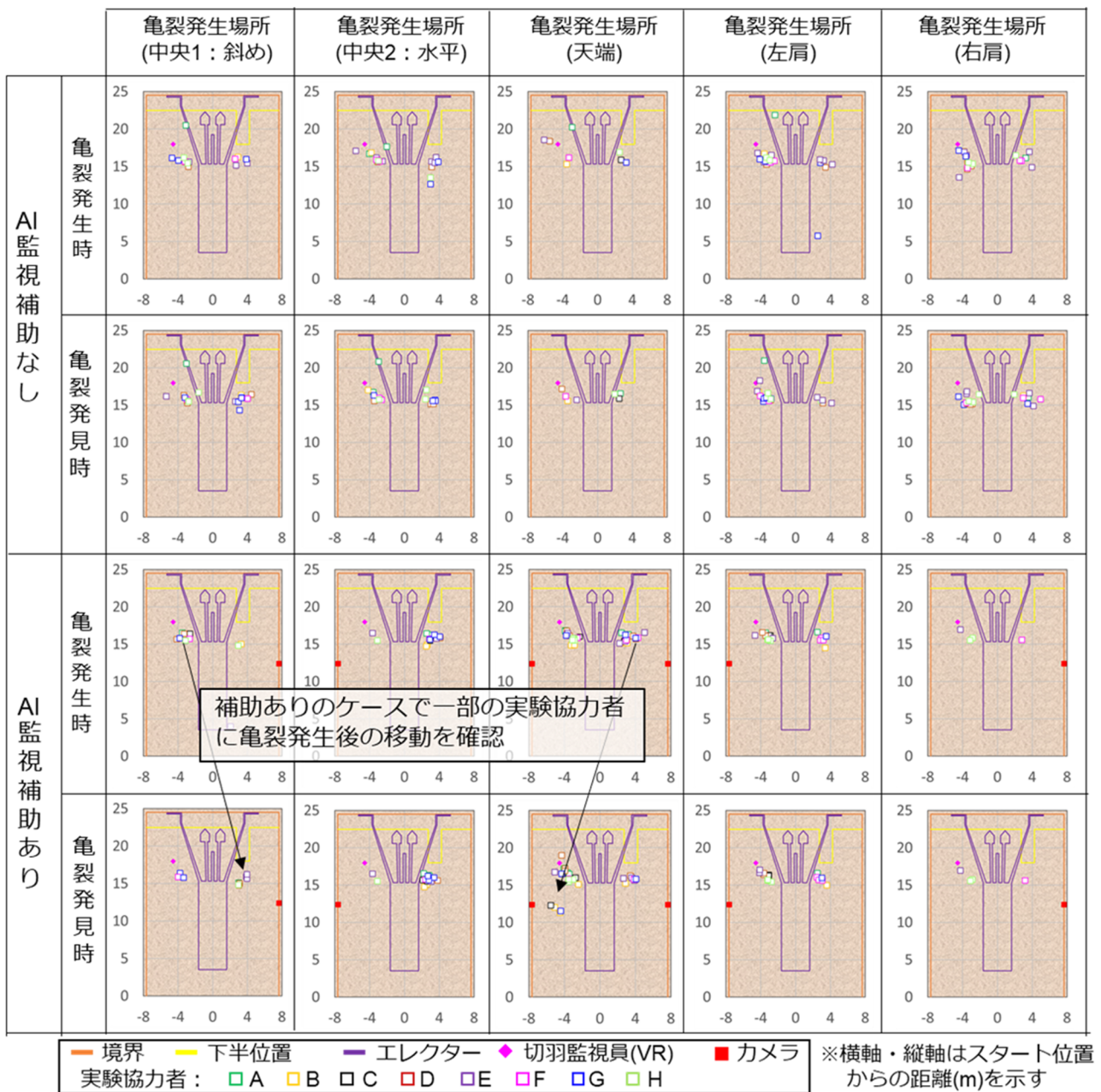


図4 亀裂発生場所による VR 内切羽監視位置の比較

切羽監視支援システムによる支援方法により、以下の4条件を設け、各条件において、任意の場所に発生する上記の亀裂を検知した。4条件は、1：目視監視（切羽監視支援システムの補助なし）、2：右側にカメラ設置を想定した切羽監視支援システムの補助がある状態での監視、3：左側にカメラ設置を想定した切羽監視支援システムの補助がある状態での監視、4：左右両側にカメラ設置を想定した切羽監視支援システムの補助がある状態での監視とした。なお、切羽監視支援システムによる監視補助がある条件下では、切羽監視支援システムに過剰に依存する事態を回避する目的で、上記5種類の亀裂に加えて、疑似クラック（切羽監視支援システムでは亀裂検知しタブレット上で警告を発するが、VR内の鏡吹付け面には出現しない亀裂）を2本出現させた。VRを用いた実験において、切羽に出現するクラックのみの実験にした場合、切羽に発生した全てのクラックを切羽監視システムにより、タブレット端末上で検出することとなる。その場合、実験協力者が切羽上でクラックを確認できなくても、タブレット上に検出されたクラック位置と同位置の切羽面をクリックすることで、クラック発見の判定となり、本システムの切羽監視者の補助的役割とは異なった用途の使用になると考えられた。一方、実際の切羽監視システムでは、様々な現場環境下で使用することが想定され、疑似クラックで再現したようなクラックの検出漏れが発生することが想定される。そのため、VR内環境を実環境に近づけるために、ランダムに疑似クラックを取り入れることで、実験協力者が全面的に切羽監視支援システムに依存した切羽監視を行うのではなく、切羽監視の補助的な役割としての切羽監視支援システム導入の効果を今回の実験により確認した。実験では、スタートしてから亀裂検知までの時間及び実験協力者が亀裂を検知した位置を測定した。

### 3. 切羽監視支援システムの有効性検証

#### (1) 切羽監視支援システムと切羽監視責任者の視野分担

最初に発生する亀裂の発生前後で各実験協力者の監視位置を切羽監視支援システムの補助の有無別に示したものを図-4に示す。鏡吹付け面に亀裂が発生した時点までを亀裂発生、切羽監視支援システムによる警告または自発的視認により亀裂を認めた場合を亀裂発見と定義した。

亀裂発生及び亀裂発見ともに、8人中7人の実験協力者は、VR内の監視者の位置（切羽面から6.5m）～切羽面から10mの間、すなわちエレクターアームの付け根位置～VR内に存在する監視者の位置（切羽面から10m）において、切羽監視を行っていることが明らかとなった。しかし、切羽監視支援システムの補助がない場合、亀裂発見位置は、切羽監視支援システムの補助がある場合と比べ、監視位置のばらつきが大きいという結果だった。

切羽監視支援システムの有無で亀裂発生位置別に発生前後の監視者の監視位置を比較すると（図-4）、切羽監視支援システムを設置しない場合には、亀裂発生による監視者の位置の変化が亀裂発見前後で少ないが、切羽監視支援システムを設置した場合は、一部の実験協力者で切羽監視支援システム設置側への移動が確認された。また、監視位置の左右差については、切羽監視支援システムがない場合には、左側から監視する実験協力者が多い傾向があったが、切羽監視支援システムを導入することで、カメラの反対側で切羽監視支援システムと協調して監視を行う監視者が多いことが確認された。

切羽監視支援システムの設置方法による監視者の監視状況を調べるため、最初に発生する亀裂の発生前後における監視者の監視位置を実験条件ごとに分類した（図-5）。目視監視の場合は、左側からの監視が多いが、切

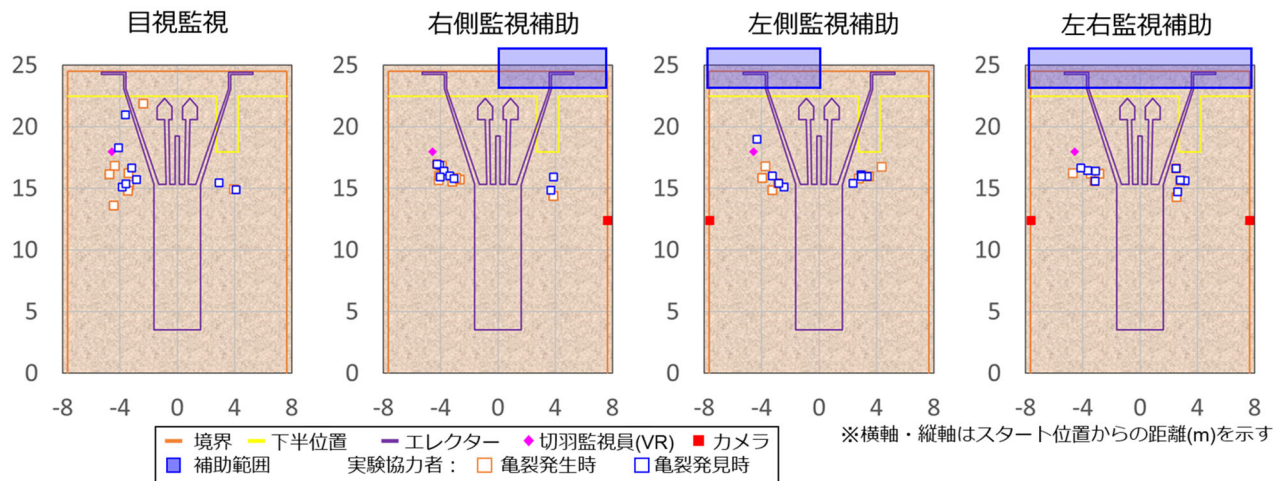


図-5 実験ケースごとの亀裂発生前後における監視位置

表-2 切羽監視支援システムの設置方法による監視者の平均移動距離

	目視監視	右側監視補助	左側監視補助	左右監視補助
平均移動距離(m)	51.3	30.7	35.3	44.8

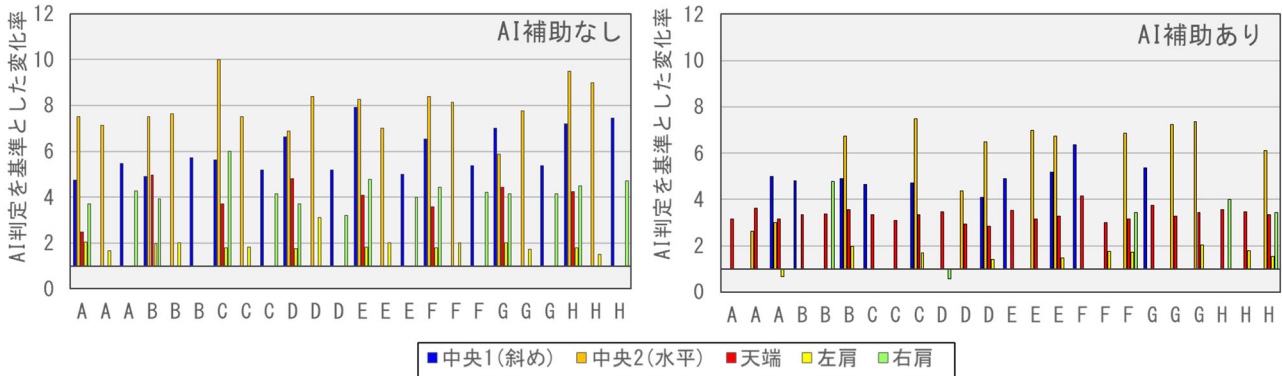


図-6 切羽監視支援システムを基準とした変化率の比較

羽監視支援システム導入では、カメラ位置と逆側から監視を行っていることが確認された。この結果は、切羽監視者は、切羽監視支援システムを全面的に信頼してはいないものの、ある程度の視野分担を行いながら切羽監視を行っている可能性があることを示唆している。

切羽監視支援システムの設置方法による比較をするため、5本の亀裂を発見するまでに監視者が移動した距離の平均値を算出した。切羽監視支援システムの設置方法による監視者の平均移動距離を表-2に示す。この結果から、切羽監視支援システム導入により、亀裂発見までの平均移動距離は目視の監視と比べ、平均28%程度低減され、移動に費やす時間の短縮を図ることで、亀裂監視業務を効率的に行っていることが明らかとなった。

(2) 動的に変化するリスクに対するリスク低減策の妥当性

a) 切羽監視時間への影響

図-7に切羽監視支援システムの有無による平均亀裂発見時間を亀裂発生場所毎にまとめた。目視による切羽監視は、切羽監視支援システム導入時の監視と比べ、亀裂発見までに時間を要することが明らかとなった。特に、目視による監視と比べ協調監視による亀裂発見時間は、平均約20%（平均約13秒）の短縮が可能であることが明らかとなった。また、亀裂発生場所によって発見時間に差異が認められ、特に天端に発生した亀裂の発見時間が最も長かった。

切羽監視支援システム導入による亀裂発見時間の短縮効果を定量的に把握するため、切羽監視支援システムの亀裂発見時間を基準とした変化率を式1aの通り定義し、切羽監視支援システムの有無毎に算出した(図-6)。

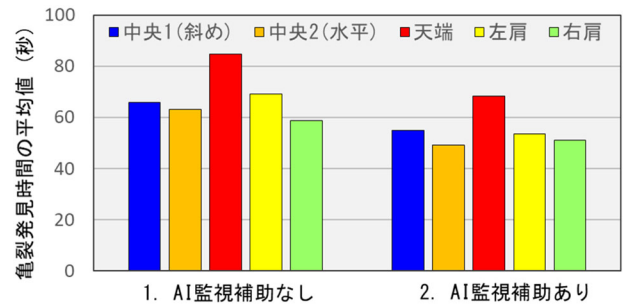


図-7 切羽監視支援システムの有無による平均亀裂発見時間

$$\left( \text{亀裂発見時間の変化率} \right) = \frac{\left( \text{亀裂発見時間} \right)}{\left( \text{基準となる亀裂発見時間} \right)} \quad (1a)$$

切羽監視支援システムを基準とする変化率が協調監視の場合には、1.6~6.4となっており、切羽監視支援システムの亀裂発見時間は、実験協力者の亀裂発見時間よりも非常に早いことが確認された。この結果は、切羽監視支援システムの亀裂検知性能は人と同等以上の性能を有していることを示しており、実際の切羽監視支援システムと同様の性能を有している<sup>3)</sup>と考えられる。また、今回提示した疑似クラックに対する判定に対しては、ほとんどの実験協力者が、疑似クラックを正しく認識しており（疑似クラックの正答率94%）、切羽監視支援システムのクラック検出結果を全面的に信じるのではなく、実際に亀裂を目視で確認した後で判断していると考えられる。そのため、今回の条件では、切羽監視支援システムが告知した亀裂の検知箇所を重点的に目視監視していたと考えられる。その際の時間は実験協力者が亀裂を認識

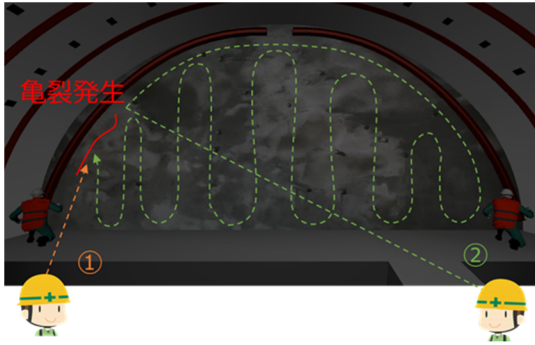


図-8 亀裂発生時の監視者の目線のイメージ

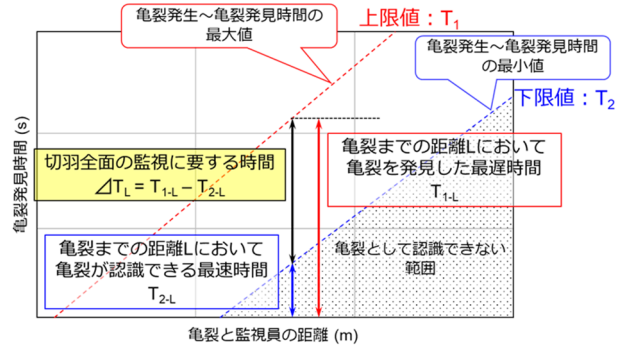


図-9 切羽監視に要する時間の概念図

できる最速の時間を示していると仮説を立て、それを用いることで、切羽監視距離に応じた切羽全面の監視に要する時間が算出できると考えられる。

### b) 切羽監視密度

今回の実験条件下では、亀裂発見までの時間は、実験協力者によりばらつきがみられた。これは、図-8のように亀裂発生後、亀裂が成長して目視で見えるようになった直後、発生場所に近い位置を監視しており、最速で亀裂を見つけられる場合(図-8-①)や切羽全面を監視して最後に亀裂発生場所で亀裂を発見する場合(図-8-②)等、監視者の目線の動きにより様々な場合が想定される。

図-9に切羽監視に要する時間の概念図を示す。亀裂と監視者の距離の増大に伴い、発見時間が長くなることが考えられる。亀裂が発生してから目視で見えない範囲があり、亀裂が目視で確認できるようになってから最速で発見できる人の傾向を下限値とすると、最遅で発見する人の傾向の上限値との差が、とある切羽と亀裂の距離において切羽全面をくまなく監視する時間(監視に要する時間)であると考えられる。今回、時間あたりに監視できる切羽面積を監視密度と定義し、監視密度(1秒当たりの切羽監視面積)の算出は、切羽全面の監視に要する時間( $\Delta T = T_{1L} - T_{2L}$ )を用いた。

図-10に今回の実験で得られた亀裂と監視者の距離及び亀裂発見時間の関係を示す。図中の破線は、各距離における下限値(青破線)と上限値(赤破線)の近似直線である。これらの傾向から、亀裂発見時間は、監視員と亀裂の距離の増加に伴い大きくなることが明らかとなった。また、亀裂発見時間の下限の近似直線は、切羽監視支援システムを導入した際の計測時間に大きく依存し、上限の近似直線は、切羽監視支援システムを導入しない場合の計測時間に大きく依存していることが確認された。これらの近似直線を用いることで、監視密度を算出すると式1bで表される。

今回の実験に用いた切羽の面積は72.8m<sup>2</sup>であり、その値を上記の式に当てはめることで、亀裂と切羽監視責任

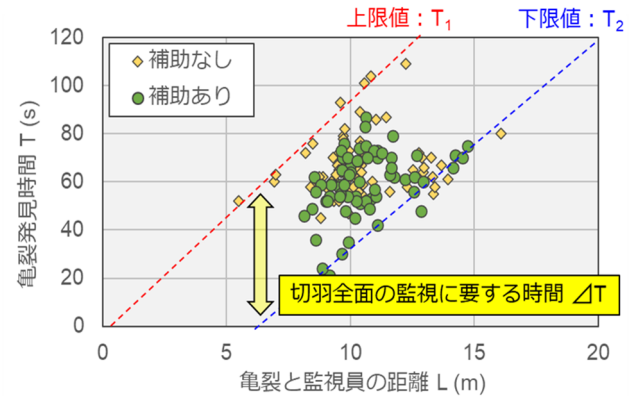


図-10 亀裂と監視者の距離及び亀裂発見時間の関係

者の距離に応じた監視密度を求めることができる。亀裂と切羽監視責任者の距離を10.5mとすると、監視密度は1.2m<sup>2</sup>/sが算出される。

$$\begin{aligned}
 (\text{切羽監視密度}) &= \frac{(\text{切羽監視面積} S)}{(\text{切羽全面の監視に要する時間} \Delta T)} \\
 &= \frac{(\text{切羽監視面積} S)}{(\text{上限値} T_1) - (\text{下限値} T_2)} \\
 &= \frac{S}{1.0L + 50}
 \end{aligned}$$

ここで、 S : 切羽面積(m<sup>2</sup>)  
L : 亀裂と監視員の距離(m)

一方、切羽監視支援システムについては、死角となる部分を算出する必要がある。死角を考慮した監視範囲の算出をすると、右側壁に設置したカメラにおける監視範囲は、切羽面積の49.7%、左側に設置したカメラにおける監視範囲は切羽面積の50.7%となった。そのため、切羽後方10mに設置したカメラの監視面積は、切羽全面

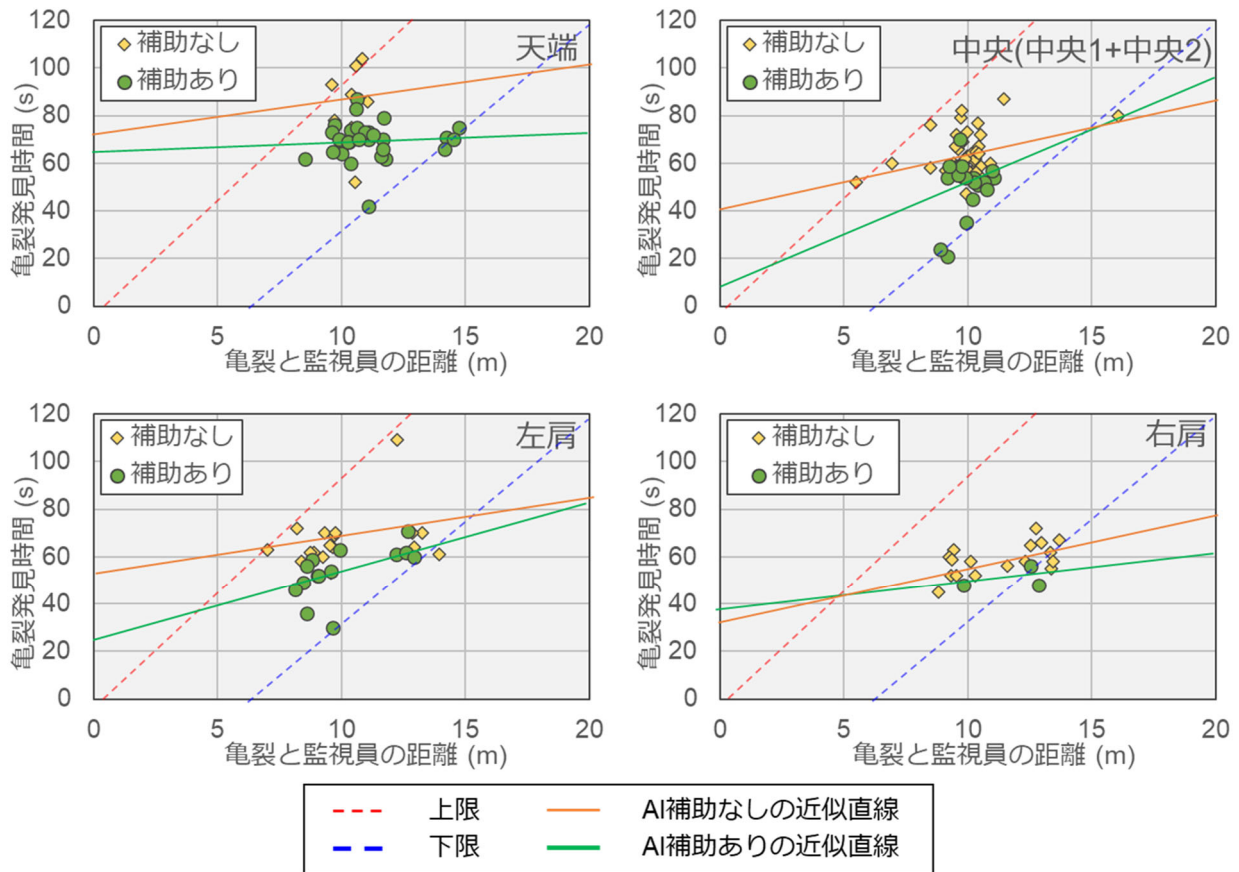


図-11 亀裂発生場所における亀裂と監視者の距離及び、亀裂発見時間の関係

に対して約 50%である 45.9m<sup>2</sup>を監視している。また、切羽監視支援システムの撮影動画の転送から亀裂検知までの時間は 3.5 秒である。これら監視面積、亀裂検知時間を用いて、実験協力者の監視密度と同様に切羽監視支援システムの監視密度を求めると 13.1m<sup>2</sup>/s の値を得た。この値は、切羽監視責任者より約 10.9 倍高い値である。なお、左右側壁に設置したカメラの監視範囲は、それぞれ 50%程度であるため、左右両側面にカメラを設置し、監視することで、死角をほぼなくすることができる。

### c) 切羽監視支援システム導入によるリスクの低減

図-11 に今回の実験で得られた亀裂と切羽監視責任者の距離及び亀裂発見時間の関係を亀裂発生場所毎に表したものを示す。図中の破線は、前項で得られた各距離における下限値 (青破線) と上限値 (赤破線) の近似直線である。また、図中の実線は、各亀裂発生場所において切羽監視支援システム補助の有無毎に算出した近似直線である。この結果から、上限値と下限値で囲まれた範囲内において、切羽監視支援システムと協調監視を行った方が、目視の監視より早く亀裂を発見できることが明らかとなった。

亀裂と切羽監視責任者の距離が分かれば、実線で描かれた近似直線を用いて、亀裂発生場所毎に推定亀裂発見時間を求めることができる。亀裂と切羽監視責任者の平

表-3 亀裂発生箇所による 10.5m 位置における平均亀裂発見時間 (秒)

	中央	天端	左肩	右肩
AI補助あり	54	69	55	38
AI補助なし	65	85	68	57

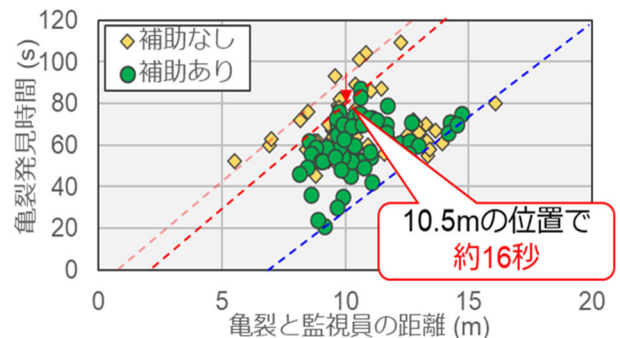


図-12 亀裂と監視者の距離及び、亀裂発見時間の関係 (監視補助の有無の比較)

均距離 10.5m における各発生位置における亀裂発見時間を表-3 に示す。この結果から、10.5m の位置では、亀裂

発生場所により多少違いはあるものの、切羽監視支援システム導入により 9～19 秒早く亀裂が発見できることが明らかとなった。

切羽監視支援システムによる補助の有無でリスク低減効果を亀裂発見時間を用いて確認する。図-12 に補助の有無で比較した結果を示す。その結果、切羽監視支援システムの導入により、監視すべき切羽面が特定されるため、平均亀裂発見距離 10.5m において亀裂発見までの時間を約 16 秒短縮できることが明らかになった。成人男性の一般的なジョギング速度は、8km/h であることが知られているため、亀裂発見時間を 16 秒短縮できれば、切羽から約 36m 離れることができる。切羽の肌落ちは基本的に岩塊の崩落現象であり、今回の場合、15.3m 程度 (1D) が被災エリアになると考えられる。そのため、今回の実験で用いた人の監視能力と同等以上の監視能力を有する切羽監視支援システムの導入により、作業員は被災エリアから十分離れることができ、作業員の安全性向上が期待できる。

切羽監視支援システムの導入により、亀裂発見時間を削減でき、亀裂発見後直ちに退避指示を出すことで、肌落ち等のリスクから回避できる可能性が高くなることが実証された。

#### 4. まとめ

今回の実験により、AI を搭載したカメラを用いた鏡吹付け面における亀裂同定の支援をする「切羽監視支援システム」を導入することで、以下の知見が得られ、切羽監視支援システムの導入により、亀裂発見時間を短縮でき、亀裂発見後直ちに退避指示を出すことで、肌落ち等のリスクから回避できる可能性が高くなることが実証された。

- ・ 8 人中 7 人の切羽監視員 (実験協力者) は、切羽面から 6.5～10m 離れた位置で切羽監視を行っている。
- ・ 切羽監視支援システムを導入することで、監視員は、切羽監視支援システム設置位置と反対側から監視を行っており、視野分担している。
- ・ 目視監視と同等以上の亀裂検知性能を有する切羽監視支援システムを導入することで、監視員は目視監視よりも平均で約 13 秒早く亀裂を発見することができる。
- ・ 亀裂発見時間は、監視員と亀裂の距離に伴い大きくなる。
- ・ 亀裂と監視員の距離を考慮した監視員の監視密度 ( $m^2/s$ ) は、監視対象の切羽面積 (S) と監視員と亀裂の距離 (L) を用いて、 $S/(1.0L + 50)$  で表すことができる。
- ・ 切羽後方 10m に設置した切羽監視支援システムの監視密度は、 $13.1m^2/s$  であり、監視員と亀裂の平均距離 10.5m における監視員の監視密度 ( $1.2m^2/s$ ) の約 11 倍である。
- ・ 切羽監視支援システムを導入することで、監視員と亀裂の平均距離 10.5m における亀裂発見時間を最大約 16 秒短縮できる。

#### 参考文献

- 1) 淡路動太, 有家舜祐, 邊見涼, 三原泰司, 伊原広明: AI 鏡吹付けコンクリートクラック検知システム 土木建設技術発表会 2020, II-4, 2020
- 2) 有家舜祐, 邊見涼, 淡路動太: トンネル切羽における AI を用いた鏡吹付けコンクリート面のクラック検知システムの開発, 土木学会第 75 回年次学術講演会, CS15-26, 2020
- 3) 長谷陵平, 淡路動太, 三原泰司, 清水尚憲, 北條理恵子: 切羽の鏡吹付けコンクリートに発生する亀裂認識実験による AI クラック検知システムの適用性評価, 土木学会第 77 回年次学術講演会, VI-234, 2022 (2022. 8. 26 受付)

## VALIDITY EVALUATION OF TUNNEL FACE MONITORING SUPPORT SYSTEM USING A VIRTUAL ENVIRONMENT IN VR

Ryohei HASE, Yasuji MIHARA, Dohta AWAJI, Rieko HOJOH and Shoken SHIMIZU

Disasters due to collapse of tunnel face have still been problem at tunnel construction sites. Once such accident occurs, it is often a severe case. To avoid this situation, it is necessary to detect crack on tunnel face as soon as possible before the occurrence of bed rock cave-in, and secure time for evacuate from there. Until now, identification of crack has been widely depended on human visual inspection. However, there are many situations where visual inspection is difficult at tunnel construction sites. We are now developing a "tunnel face monitoring supportive system" that helps crack identification on tunnel surface using a camera with AI. This paper describes the history of the development of the system, and experiments using VR images of cracks at the shotcrete surface of tunnel face to experimentally verify whether crack identification is more effective than human visual inspection, and to quantitatively and objectively evaluate the effectiveness of the system. The experimental results show that the system reduces the evacuation time and supports efficient crack monitoring.